

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R SM.1753-1
(04/2010)

**Méthodes de mesure du
bruit radioélectrique**

Série SM
Gestion du spectre



Union
internationale des
télécommunications

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2010

© UIT 2010

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R SM.1753-1

Méthodes de mesure du bruit radioélectrique

(2006-2010)

Domaine d'application

Pour effectuer des mesures du bruit radioélectrique, il est nécessaire de disposer d'une méthode uniforme et indépendante de la fréquence si l'on veut obtenir des résultats comparables, précis et reproductibles entre les différents systèmes de mesure. Dans la présente Recommandation on trouvera un ensemble de processus ou d'étapes qui devront être intégrés dans une procédure de mesure afin d'obtenir des résultats comparables.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, compte tenu de la mise en œuvre de nombreux types d'équipements électriques et électroniques (produisant du bruit radioélectrique) et de réseaux de radiocommunication (à ultra-large bande, lignes de télécommunication par courants porteurs sur réseau électrique, ordinateurs par exemple), les niveaux de bruit radioélectrique indiqués dans la Recommandation UIT-R P.372 pourraient augmenter;
- b) que, pour une gestion efficace du spectre des fréquences, les administrations doivent connaître les niveaux exacts de bruit;
- c) qu'il est nécessaire d'harmoniser les méthodes de mesure du bruit pour obtenir des résultats reproductibles susceptibles d'être comparés;
- d) que, pour les mesures du bruit, un nombre minimal de spécifications est indispensable,

recommande

- 1 d'effectuer les mesures du bruit radioélectrique comme décrit dans l'Annexe 1.

Annexe 1**Méthodes de mesure du bruit radioélectrique****1 Introduction**

La présente Annexe décrit des méthodes de mesure et d'évaluation du bruit dans le cadre d'applications pratiques de radiocommunication.

2 Sources de bruit radioélectrique

- rayonnements dus aux décharges orageuses (bruit atmosphérique dû à la foudre);
- rayonnements parasites cumulatifs émanant de machines électriques, d'équipements électriques et électroniques, de lignes de communication par courants porteurs sur le réseau électrique ou de systèmes d'allumage des moteurs à combustion interne (bruit artificiel);
- émissions émanant des gaz atmosphériques et des hydrométéores;

- obstacles au sol et autres situés à l'intérieur du faisceau d'antenne;
- rayonnements émanant des sources radioélectriques cosmiques.

Etant donné que le bruit dû à des causes naturelles ne changera probablement pas de manière significative sur de longues périodes de temps, le bruit artificiel est souvent dominant dans certaines parties du spectre des fréquences radioélectriques et leur intensité pourrait évoluer compte tenu de la densité croissante d'utilisation d'appareils électriques et électroniques, avec la mise en œuvre de nouveaux types de dispositifs, et les modifications des dispositions visant à améliorer la compatibilité radioélectrique. Par conséquent, le type bruit artificiel est principalement celui qui présente un grand intérêt lors de la mesure du bruit radioélectrique.

TABLEAU 1

Importance des sources de bruit radioélectrique par plage de fréquence

Source de bruit	Plage de fréquences principalement concernées
Bruit atmosphérique dû aux décharges orageuses	9 kHz à 30 MHz
Bruit cosmique	4 MHz à 100 MHz
Bruit artificiel	9 kHz à 1 GHz
Emissions des gaz atmosphériques, etc.	>10 GHz

3 Composantes du bruit radioélectrique

La Recommandation UIT-R P.372 définit le bruit radioélectrique comme étant la somme des rayonnements de plusieurs sources qui ne sont pas des émetteurs de radiocommunication. Si en un emplacement de mesure donné, il n'y a pas prédominance d'une source de bruit unique, la caractéristique du bruit radioélectrique a souvent une distribution normale en amplitude et peut être considéré comme étant du bruit blanc gaussien.

Toutefois, compte tenu de la forte densité de dispositifs émetteurs de bruit, que l'on observe en particulier dans les villes et les zones résidentielles, il est pratiquement impossible de trouver un emplacement qui n'est pas au moins temporairement dominé par du bruit ou des émissions émanant d'une source unique. Ces sources émettent souvent des impulsions ou des porteuses uniques. Etant donné qu'un équipement de radiocommunication doit fonctionner dans un tel environnement, il peut être irréaliste d'exclure ces composantes des mesures du bruit radioélectrique.

TABLEAU 2
Composantes du bruit radioélectrique

Composante du bruit	Propriétés	Sources (exemples)
Bruit blanc gaussien ⁽¹⁾	Vecteurs électromagnétiques non corrélés. Largeur de bande égale ou supérieure à celle du récepteur. Niveau de puissance spectrale augmentant proportionnellement à la largeur de bande.	Ordinateurs, réseaux de communication par courants porteurs sur le réseau électrique, réseaux de communication câblés, bruit cosmique
Bruit impulsif	Vecteurs électromagnétiques corrélés. Largeur de bande supérieure à celle du récepteur Niveau de puissance spectrale augmentant avec le carré de la largeur de bande	Étincelles d'allumage, foudre, dispositifs d'allumage pour ampoules à gaz, ordinateurs, dispositifs à ultra-large bande
Bruit d'une porteuse unique	Une ou plusieurs raies spectrales distinctes Largeur de bande inférieure à celle du récepteur. Niveau de puissance spectrale indépendant de la largeur de bande	Réseaux informatiques câblés, ordinateurs, alimentations électriques à découpage

⁽¹⁾ Dans le contexte de la présente Annexe, le bruit blanc gaussien est considéré comme représentant un signal de bruit continu qui présente une densité spectrale de bruit uniforme dans les plages de fréquences autour de la largeur de bande de mesure.

La composante bruit blanc gaussien est valablement caractérisée par la valeur quadratique moyenne; en revanche, ce qui est beaucoup plus difficile pour le bruit impulsif. Les services de communication numérique modernes appliquent pour la plupart une correction d'erreur, ce qui les rend particulièrement moins sensibles au bruit impulsif. Toutefois, en présence de certaines longueurs d'impulsion et de certains taux de récurrence de ces impulsions, le bruit impulsif peut fortement perturber le fonctionnement de ces services.

Il est donc souhaitable de mesurer le bruit radioélectrique de manière à obtenir non seulement le niveau du bruit impulsif mais aussi certaines informations sur la distribution statistique des paramètres relatifs aux impulsions.

Le bruit dû à une porteuse unique est uniquement détecté en tant que tel lorsqu'il émane d'une seule source au voisinage de l'emplacement de mesure. Plusieurs sources émettant des porteuses uniques rapidement s'additionnent pour former un spectre analogue à du bruit lorsque leur nombre augmente. La Recommandation UIT-R BT.372 définit le bruit radioélectrique comme étant le rayonnement cumulatif involontaire émanant de diverses sources et exclut spécifiquement les émissions émanant de sources uniques identifiables. Il est donc nécessaire de choisir des emplacements de mesure et/ou des fréquences qui ne sont pas dominés par des rayonnements émanant de ces sources uniques qui rendent inutiles un examen plus approfondi du bruit dû à une porteuse unique dans le contexte de mesures du bruit artificiel.

4 Paramètres clé

Les procédures de mesure décrites ici donnent des résultats pour les paramètres suivants du bruit radioélectrique:

Bruit blanc gaussien (WGN):

- niveau quadratique moyen, présenté comme une seule valeur ou des valeurs médianes horaires sur la journée.

Bruit impulsif (IN):

- niveau de crête, présenté sous forme d'une distribution
- durée des impulsions/salves, présentée sous forme d'une distribution
- période des impulsions/salves, présentée sous forme d'une distribution.

5 Principes de mesure

La composante bruit blanc gaussien peut être mesurée au moyen d'un détecteur de valeur quadratique moyenne. Cette méthode de mesure est ici désignée par l'expression «méthode de la valeur quadratique moyenne». En utilisant la réduction à 20% décrite au § 10.3, il est possible d'obtenir la valeur quadratique moyenne du bruit directement à partir d'une exploration en fréquence même si certaines de ces fréquences sont occupées par des signaux utiles.

Le bruit impulsif (IN) toutefois, peut uniquement être mesuré par échantillonnage rapide des valeurs d'amplitude RF instantanées. Ces valeurs sont mémorisées pour évaluation en différé destinée à obtenir les paramètres des impulsions. La mesure est de préférence effectuée sur une seule fréquence qui ne contient pas de signal utile et de porteuse continue. L'intervalle de temps maximal entre deux échantillons consécutifs est donné par la relation

$$T_s \leq \frac{1}{2 * RBW} \quad (1)$$

dans laquelle:

T_s : intervalle de temps entre deux échantillons consécutifs

RBW : largeur de bande du filtre utilisé pour la mesure.

Cette méthode de mesure est ici appelée «méthode d'échantillonnage de données brutes».

6 Type de mesure

La détermination du niveau et des caractéristiques du bruit artificiel y compris du bruit impulsif sur toutes les plages de fréquences peut être une tâche de mesure complexe et longue. Toutefois, lorsque l'on étudie uniquement la composante bruit blanc gaussien ou que seules certaines plages de fréquences doivent être étudiées, les mesures peuvent être fortement simplifiées sans perte d'informations importantes ou baisse de précision. C'est pourquoi on recommande les trois méthodologies différentes suivantes pour les mesures du bruit radioélectrique:

Type A: Bruit blanc gaussien uniquement. Ce type donne uniquement les niveaux de bruit blanc gaussien en négligeant le bruit impulsif. Il requiert seulement la mesure des niveaux quadratiques moyens restants sur une fréquence «libre». Les méthodes d'échantillonnage des valeurs quadratiques moyennes et des données brutes peuvent toutes deux être appliquées. L'évaluation des données est relativement simple.

Type B: Bruit blanc gaussien et bruit impulsif. Ce type donne les niveaux de bruit blanc gaussien et les caractéristiques des paramètres importants de bruit impulsif du bruit radioélectrique. Il requiert un échantillonnage rapide des données (méthode d'échantillonnage de données brutes). L'évaluation des données est plus complexe et requiert un important post-traitement qui en grande partie peut être effectué par des ordinateurs.

Type C: Bruit blanc gaussien, bruit impulsif et séparation du bruit artificiel. Outre le niveau du bruit blanc gaussien et les caractéristiques du bruit impulsif, ce type permet de séparer le bruit artificiel et le bruit impulsif du bruit atmosphérique en grande partie qui peut être important dans la bande des ondes décimétriques. Le processus de mesure est semblable à celui du Type B, mais il doit être réalisé en deux emplacements différents avec deux équipements synchronisés dans le temps.

Le choix du type de mesure adéquat dépend des exigences, de la catégorie environnementale et de la plage de fréquences. Si les résultats des mesures sont destinés à un usage général, le type recommandé est souligné

TABLEAU 3

Types de mesure recommandés

Plage de fréquences	Mesures à l'extérieur	Mesures à l'intérieur
9 kHz – 300 kHz (LF)	A, B	A, B
300 kHz – 3 MHz (MF)	A, B, C	A, B
3 MHz – 30 MHz (HF)	A, B, C	A, B
30 MHz – 300 MHz (VHF)	A, B	A, B
300 MHz – 3 GHz (UHF)	A, B	A, B
> 3 GHz (SHF)	A	A

7 Spécifications des équipements

7.1 Récepteur et préamplificateur

Le récepteur de mesure doit être un récepteur de mesure standard transportable ou un analyseur de spectre associés à un éventuel préamplificateur additionnel tel un amplificateur à faible bruit (LNA) qui doivent présenter un faible facteur de bruit ainsi qu'une grande stabilité de gain qui est essentielle pour la qualité des mesures de bruit.

Afin de garantir une précision de mesure acceptable, il faut maintenir le bruit mesuré à au moins 10 dB au dessus du bruit de fond de l'équipement si l'on utilise un détecteur de valeur quadratique moyenne. Un amplificateur externe à faible bruit lors des mesures de faibles rapports signal à bruit peut contribuer à la réalisation de cet objectif. Ceci est fondamental pour les fréquences supérieures à 20 MHz.

Il faut veiller à utiliser un récepteur de mesure avec correction intégrée des erreurs qui affectent les résultats lorsqu'on mesure de faibles rapports signal/bruit. Lorsque cette correction du bruit est commutable, on peut l'activer. Toutefois, dans ce cas, aucune autre correction supplémentaire tel que décrite au § 10.2 n'est applicable.

Les prescriptions relatives au système de mesure sont données dans le Tableau 4 qui ne décrit pas un nouvel ensemble de spécifications des récepteurs de mesure ou de LNA mais signale les spécifications supplémentaires ou particulières nécessaires d'un récepteur ou d'un LNA utilisé pour

les mesures de bruit. En outre, les désignations des bandes de fréquences se fondent sur la mise en œuvre pratique d'un système de mesure du bruit et ne sont pas destinées à mettre en avant un système de réception particulier.

TABLEAU 4

Prescriptions d'un système de mesure du bruit (récepteur/LNA)

Fonction	Plage de fréquences		
	9 kHz – 30 MHz	30-500 MHz	0,5-3 GHz
Entrée (entrée antenne), taux d'ondes stationnaires	50 Ω , nominal < 1,5		
Interception du 3ème ordre	≥ 20 dBm (> 3 MHz)	≥ 10 dBm	≥ 0 dBm
Interception du 2ème ordre	≥ 60 dBm (> 3 MHz)	≥ 50 dBm	≥ 40 dBm
Présélection	Jeu de filtres de bande sous-octave ou filtre suiveur	Filtre suiveur ou fixe Filtre passe-bas/passe-haut	
Facteur de bruit total	≤ 15 dB (> 2 MHz)	≤ 2 dB ⁽¹⁾ (> 20 MHz)	≤ 2 dB ⁽¹⁾
Elimination FI	> 80 dB	> 90 dB	> 100 dB
Elimination image	> 80 dB	> 90 dB	> 100 dB
Gain du LNA	≤ 18 dB	≤ 25 dB	≤ 25 dB
Stabilité de gain du LNA	$\leq 0,7$ dB à 20-30°C		
Constance du gain du LNA sur la plage de fréquences étudiée	< 0,4 dB	< 0,4 dB	< 0,5 dB
Commande automatique de gain	Les résultats obtenus doivent porter sur des mesures sans utilisation de la commande automatique de gain		
Compatibilité électromagnétique du montage de mesure y compris les ordinateurs et l'interface	Tous les brouillages produits et reçus par le montage de mesure doivent être d'au moins 10 dB inférieurs au bruit moyen à mesurer		

⁽¹⁾ Ce facteur de bruit concerne le LNA.

Lorsqu'on utilise un LNA, les spécifications du Tableau 4 doivent être respectées par toute la combinaison récepteur-LNA. Le facteur de bruit du système pour cette combinaison est dominé par le facteur de bruit du LNA.

Il faut veiller à ne pas saturer le récepteur ou le LNA. On doit pour cela utiliser un filtre passe-bande externe. Aux fréquences inférieures à 30 MHz, les signaux donnant le niveau d'entrée le plus élevé proviennent des stations de radiodiffusion. L'affaiblissement du filtre passe-bande sur les bandes attribuées à la radiodiffusion doit être de 20 dB au minimum.

La sélectivité FI entre 6 et 60 dB doit être connue avec précision afin de calculer la largeur de bande du bruit lorsque les mesures effectuées avec différents filtres FI doivent être comparées. Lorsqu'elle est spécifiée, la largeur de bande de bruit peut être extraite des spécifications du récepteur. Il s'agit de la largeur de bande d'un filtre rectangulaire (filtre parfait) qui laisse passer la même puissance de bruit que le filtre du récepteur ou de l'analyseur.

7.2 Antennes

D'après la Recommandation UIT-R P.372, le niveau du bruit est exprimé en facteur de bruit (en dB au-dessus du bruit thermique) de préférence à l'intensité du champ. Ce facteur de bruit est par définition donné en référence à une antenne «sans perte». Concernant les sources de bruit qui sont uniformément réparties dans le plan horizontal ou qui sont reçues sous des angles verticaux relativement faibles, l'antenne sans perte qui répond le mieux à la situation est un doublet vertical accordé. Il est donc recommandé d'utiliser un tel doublet pour les mesures de bruit aux fréquences supérieures à 30 MHz.

Aux fréquences inférieures à 30 MHz, les doublets verticaux ne conviennent pas car ils deviennent trop encombrants. Il faut ajouter qu'ils sont uniquement parfaits s'ils sont suffisamment éloignés du sol, ce qui est de nouveau difficile à réaliser. Dans la Recommandation UIT-R P.372 on utilise donc une courte antenne unipolaire verticale sur un sol parfaitement conducteur comme antenne de référence pour les fréquences inférieures à 30 MHz. On recommande d'utiliser une courte antenne unipolaire avec une hauteur est inférieure à un dixième de la longueur d'onde comme antenne de mesure. Cette courte antenne unipolaire doit cependant être électriquement adaptée à l'impédance d'entrée du récepteur (50 Ω en général.). Cette adaptation est généralement réalisée avec des éléments actifs. Il est important qu'il n'y ait pas d'amplification supplémentaire au niveau de l'antenne étant donné que cette antenne serait alors sujette à une saturation due aux signaux intenses de radiodiffusion.

En appliquant le modèle selon lequel les sources de bruit sont uniformément reçues sous tous les angles, il n'est pas nécessaire de corriger une éventuelle directivité de l'antenne de mesure. Même si le gain de la plupart de antennes directives de type Yagi est uniquement obtenu dans la direction préférée en éliminant les signaux dans les autres directions, le gain moyen pour l'environnement de bruit est nul. Il est donc possible d'utiliser des antennes directives pour les mesures dans des circonstances où le bruit est censé être uniformément réparti pourvu qu'elles sont adaptées.

Pour le calcul du facteur de bruit externe, il est nécessaire de connaître le facteur d'antenne qui peut être utilisé pour calculer l'intensité du champ à partir de la tension d'antenne mesurée. Ce facteur est souvent donné par le fabricant, mais les points suivants doivent être soigneusement pris en considération:

- Si l'antenne est directive, le facteur d'antenne donné par le fabricant s'applique uniquement à la direction du faisceau principal. Toutefois, pour le calcul du champ du bruit, seul le facteur d'antenne moyen¹ associé aux signaux provenant d'une direction quelconque doit être utilisé.
- En particulier, aux fréquences basses il est important que les conditions sous lesquelles le fabricant spécifie le facteur d'antenne soient remplies. Des éléments comme la distance de l'antenne par rapport au sol, les occultations au proche voisinage de l'antenne et la mise à la masse peuvent fortement modifier le facteur d'antenne.

Lorsque le facteur d'antenne n'est pas connu, il peut être mesuré en utilisant une antenne de référence dont le facteur d'antenne est connu, mais les remarques ci-dessus restent valables. Une façon pratique de déterminer le facteur d'antenne consiste à comparer les niveaux mesurés avec l'antenne de mesure et ceux obtenus avec une antenne de référence et ceci pour un grand nombre d'émissions provenant de directions aléatoires, puis à moyenniser les résultats pour chaque bande de fréquence.

¹ Dans les cas où les sources de bruit sont uniformément réparties, la puissance de bruit reçue par une antenne de mesure directive ou une antenne isotrope parfaite sera la même. Dans cette situation, on obtient le facteur moyen d'antenne en appliquant une correction appropriée pour le gain d'antenne dans la direction spécifique.

Compte tenu des antennes de référence figurant dans la Recommandation UIT-R P.372 et de leur adaptation à des situations de réception réelles, le point d'alimentation de l'antenne de mesure doit se trouver sur ou proche du sol pour les fréquences allant jusqu'à 60 MHz et au moins à 5 m au-dessus du sol pour les fréquences plus élevées.

8 Analyse de l'incertitude

Le résultat final de la mesure doit refléter une valeur réelle qui peut être reproduite même si un autre montage de mesure est utilisé. Il faut non seulement connaître la précision moyenne mais aussi les limites dans lesquelles les valeurs peuvent changer. Un bilan d'incertitude contenant tous les éléments qui contribuent à l'incertitude totale doit être établi pour chaque mesure. On trouvera des exemples dans le «Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure» de l'ISO.

9 Processus de mesure

9.1 Choix des emplacements de mesure

Même sur une fréquence, le niveau du bruit radioélectrique, en particulier lorsqu'il est dominé par du bruit artificiel, varie dans le temps et avec le lieu. Dans les bandes de fréquences inférieures à 30 MHz, les niveaux de bruit varient principalement dans le temps en raison des conditions de propagation. Par conséquent, plusieurs mesures en des emplacements différents doivent être effectuées. La Recommandation UIT-R P.372 définit quatre catégories d'emplacements différentes. Pour refléter les différences résultantes de niveau de bruit artificiel, il convient de choisir les sites de mesure conformément à leur catégorie. Toutefois, pour obtenir une évaluation plus détaillée, il est recommandé de classer les mesures de bruit selon les catégories suivantes:

TABLEAU 5
Critères de sélection des lieux pour les mesures à l'extérieur

Catégorie	Définition
Rural reculé	Pas de présence humaine clairement identifiée, pas de construction, pas de trafic, pas d'installation électrique dans un rayon de 5 km
Rural	Campagne dégagée avec forte activité agricole, densité de construction < 1/ha, pas de route importante, pas de voies de chemin de fer électrifiées
Résidentiel	Villages et zones résidentielles pures sans activités commerciales ou industrielles. Pas de chemins de fer électrifiés, pas de routes importantes et pas de lignes haute tension dans un rayon de 1 km
Urbain	Forte densité de constructions résidentielles avec petites activités commerciales ou industrielles et des boutiques. Pas de chemins de fer électrifiés, de routes importantes, de lignes ou installations haute tension dans un rayon de 500 m
Ville	Forte densité de constructions industrielles ou commerciales et de bureaux. Routes et voies de chemins de fer pouvant se trouver à proximité, sans être prédominantes
Zone industrielle	Zones avec forte densité d'usines et d'industries lourdes
Chemin de fer	Lieux avec prédominance d'importantes voies de chemin de fer électrifiées
Route	Lieux avec prédominance de la circulation routière; autoroutes par exemple

Les résultats des mesures doivent être évalués séparément pour chaque catégorie d'emplacement. Pour permettre une caractérisation statistique correcte du niveau du bruit radioélectrique, les mesures doivent être réalisées sur au moins 10 emplacements par catégorie.

Tous les emplacements de mesure doivent être situés à l'extérieur. Pour évaluer le niveau de bruit radioélectrique moyen provenant de plusieurs sources extérieures, les résultats des mesures réalisées à l'extérieur peuvent être diminués de l'affaiblissement attendu des constructions pour chaque fréquence considérée.

L'expérience montre toutefois, que les niveaux de bruit à l'intérieur tendent à être même supérieurs à ceux mesurés à l'extérieur.. Cela s'explique par le fait que le bruit est dominé par quelques sources de bruit provenant de l'intérieur de la construction dans laquelle les mesures sont réalisées. Si cet environnement doit être étudié, les catégories d'emplacement mentionnées dans le Tableau 5 ne sont pas applicables car il importe peu que l'environnement soit de type ville, résidentiel ou rural. Il est donc recommandé d'utiliser les différentes catégories de construction spécifiées dans le Tableau 6.

Il convient de noter que les mesures à l'intérieur mesurent toujours la somme du bruit et des perturbations émanant de sources uniques. Dans la plupart des cas, les émissions émanant de sources uniques à l'intérieur de la maison seront prédominantes. D'après les définitions actuelles contenues dans la Recommandation UIT-R P.372, ces émissions ne sont pas du bruit artificiel. Toutefois, pour fonctionner correctement, les services de radiocommunication doivent pouvoir supporter tous les signaux non désirés, qu'il s'agisse de bruits ou de perturbations. Pour des raisons pratiques il peut être donc souhaitable de mesurer la somme des deux.

TABLEAU 6

Critères de sélection des emplacements de mesure intérieurs

Catégorie	Définition
Domestique	Une seule maison ou un seul appartement avec des appareils électriques et électroniques type destinés à un usage privé
Bureau	Appareils électriques et électroniques destinés à un usage commercial, équipements des technologies de l'information et de télécommunication, par exemple: ordinateurs, imprimantes, réseaux locaux
Centre commercial	Lieu avec boutiques et supermarchés
Station de chemin de fer	Stations de chemin de fer importantes situées à l'intérieur de plateformes abritées
Terminal d'aéroport	Aéroport important, à l'intérieur des bâtiments du terminal
Usine	Intérieur de bâtiments d'usine où prédominent des machines électriques
Hôpital	Lieux où prédominent des appareils médicaux

9.2 Choix des fréquences

Il est possible d'effectuer des mesures sur une seule fréquence (canal) ou dans une certaine bande de fréquences (par exemple, 100 kHz). Il est possible de réaliser ces observations de manière automatique et de traiter les résultats selon un protocole prédéfini.

Dans la bande des ondes décimétriques, il est virtuellement impossible de trouver une fréquence exempte d'émissions utiles pendant toute la période de mesure de 24 heures. La manière la plus simple de trouver une fréquence appropriée consiste à utiliser des informations provenant de

mesures test ou de données historiques. Toutefois, on n'a pas la garantie de pouvoir utiliser tous les échantillons de mesure en raison d'une éventuelle occupation imprévue pendant l'étude réelle. Au lieu de choisir une fréquence ou une bande fixe pour les mesures, il est souhaitable de procéder à une exploration de la bande considérée afin de déterminer le niveau du bruit blanc gaussien. La fréquence dont le niveau est le plus faible dans la bande explorée doit alors faire l'objet de mesures sur un mode fréquence unique pendant au moins 0,5 s afin de déterminer le niveau du bruit impulsif. En particulier, dans la plage des fréquences inférieures à 30 MHz dont l'occupation varie pendant une journée entière, il est recommandé de répéter la procédure de choix de fréquence avant chaque mesure.

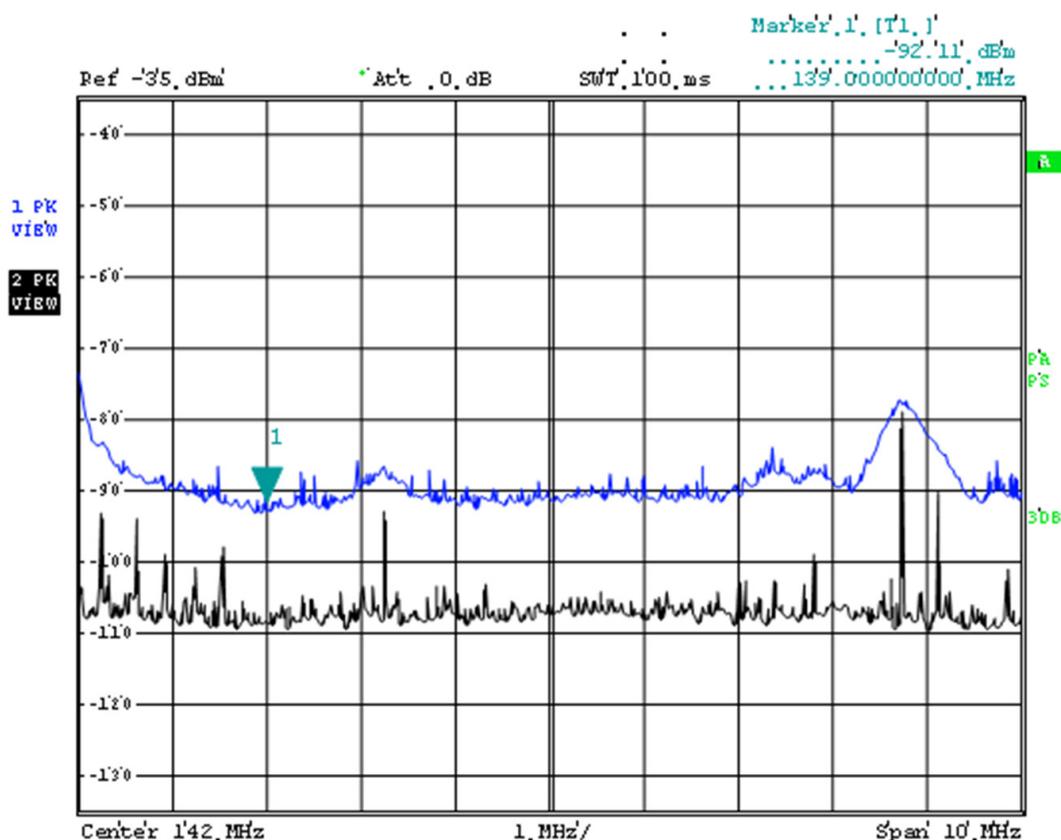
Dans la bande des fréquences supérieures à 30 MHz, les émissions utiles proviennent en général de sources nationales et l'occupation est connue. Dans ce cas, on peut utiliser une fréquence fixe sans attribution active.

L'exemple donné à la Fig. 1 montre le spectre de fréquences au voisinage de 142 MHz avec quelques émissions provenant d'utilisateurs de fréquences, relevées en mode MaxHold (mémoire du maximum) avec deux largeurs de bande de filtre (courbe supérieure: 300 kHz: courbe inférieure: 10 kHz). La fréquence ainsi repérée est choisie pour les mesures de bruit car on suppose qu'elle est exempte d'émissions et suffisamment distante des canaux utilisés.

En particulier lorsqu'on réalise une étude et une sélection automatiques sans personnel de fréquences, on ne peut pas toujours supposer que la fréquence choisie ne contient que du bruit. Le choix d'une bande de fréquences qui contient principalement du bruit de fond présentant une distribution gaussienne en amplitude améliore la précision de la mesure du niveau de la puissance de bruit. La façon la plus fiable de montrer si une fréquence (bande de fréquences) contient uniquement du bruit blanc gaussien est d'appliquer le concept mathématique de décomposition en valeurs singulières (en anglais SVD: Singular Value Decomposition). Cette méthode inclut l'élaboration d'une estimée de la matrice d'autocorrélation du signal et l'évaluation des résultats obtenus à partir de l'application du concept de décomposition précité à la matrice d'autocorrélation estimée.

FIGURE 1

Choix d'une fréquence unique



SM.1753-01

Traduction de la Figure 1:

Center: Centre
Span: Intervalle
SWR: TOS

La manière la plus commode de choisir une (bande de) fréquence(s) appropriée consiste d'abord à trouver une bande utilisable en explorant la plage de fréquences souhaitée et à identifier la (bande de) fréquence(s) dans laquelle le niveau est le plus faible. La possibilité d'utiliser de cette (bande de) fréquence(s) peut être vérifiée en appliquant le processus SVD. Si le processus SVD révèle que la (bande de) fréquence(s) explorée contient principalement du bruit blanc gaussien, on peut alors procéder aux mesures. Dans le cas contraire, il faut choisir une autre (bande de) fréquence(s).

L'Appendice 1 contient une description détaillée de la méthode SVD.

9.3 Réglages de l'analyseur/récepteur

Les réglages recommandés des équipements sont donnés dans le Tableau 7.

TABLEAU 7

Réglages de l'analyseur/récepteur

Durée de la mesure	Il est utile d'obtenir un résultat toutes les 10 à 30 s. Pour les mesures du bruit blanc gaussien avec un détecteur de valeur quadratique moyenne, il est utile d'avoir un temps de balayage ou d'exploration de 10 à 20 s. Pour l'échantillonnage de données brutes, il est utile de procéder à une exploration de 0,5 s de durée toutes le 10 à 30 s. Pendant l'exploration, les amplitudes des échantillons doivent être mesurées à une cadence très rapide (fréquence d'échantillonnage au moins égale à 1/RBW).
Plage de fréquences	La plage de fréquences pour réaliser les observations dépend entièrement de l'utilisation de la bande de fréquences choisie, laquelle peut même être divisée en sous-bandes ou en fréquences en fonction de la bande de fréquences.
Largeur de bande inversée (RBW: Reverse Band Width)	En cas d'utilisation de la méthode d'exploration de fréquences, la largeur de bande du filtrage appliqué dépend de la plage de fréquences divisée par la résolution requise. La méthode d'échantillonnage de données brutes exige une RBW égale à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. Le facteur de forme du filtre devrait être déterminé de telle façon qu'il soit possible de comparer les résultats des mesures effectuées avec différents récepteurs. Le Tableau 8 contient les valeurs de RBW recommandées.
Détecteur	Pour mesurer la puissance du bruit blanc gaussien, il faut utiliser un détecteur de valeur quadratique moyenne, tout autre détecteur étant inapproprié. Certains fabricants désignent ce détecteur par le terme détecteur moyenneur. Il est important que le détecteur donne la moyenne de la puissance et non pas de la tension. Ces détecteurs sont construits autour d'un échantillonneur dont la fréquence d'échantillonnage est basée sur la largeur de bande du filtre. La puissance quadratique moyenne est calculée à partir des échantillons sur un période de temps bien définie. Cette période de temps est la période de mesure. Si l'on utilise un détecteur de valeur quadratique moyenne sans échantillonnage, le temps d'intégration de ce détecteur doit être égal à $10/2B_N$ (kHz) si l'on s'attend à une incertitude de 1%. Ainsi, si la largeur de bande de bruit B_N est de 500 Hz,, le temps d'intégration minimal doit être de 10 s. Il faut prêter une attention particulière lorsqu'on utilise des récepteur d'ancienne génération. Lorsque les valeurs mesurées sont supérieures de moins de 10 dB au bruit de fond, ce détecteur nécessite un étalonnage particulier. L'application du principe des données brutes nécessite l'utilisation d'un détecteur d'échantillons car le traitement y compris les calculs de valeur quadratique moyenne, sont effectués ultérieurement.
Atténuateur	3 dB Il est recommandé d'utiliser un atténuateur externe entre l'antenne et le LNA afin de l'ajuster à l'impédance d'entrée du récepteur/LNA bien définie pour garantir une faible incertitude sur les mesures. Si on peut garantir que l'antenne correspond exactement à l'impédance d'entrée du LNA, l'utilisation d'un affaiblissement supplémentaire n'est pas nécessaire.
Présélecteur	Activé (si commutable)

TABLEAU 8

Largeurs de bande de mesure

Plage de fréquences	Largeur de bande inversée pour les mesures de Type A (bruit blanc gaussien uniquement)	Largeur de bande inversée pour les mesures des Types B et C (bruit blanc gaussien uniquement et bruit impulsif)
300 kHz – 30 MHz	100 Hz	10 kHz
30 MHz – 450 MHz	1 kHz	100 kHz
450 MHz – 1 GHz	1 kHz	300 kHz
1 GHz – 3 GHz	10 kHz	5 MHz
> 3 GHz	10 kHz	10 MHz

Dans ce contexte, la largeur de bande inversée est la largeur de bande de bruit équivalente de la largeur de bande nominale à 3 dB.

L'utilisation d'une largeur de bande inversée plus grande que celle indiquée dans le Tableau 8 conduit à de plus grands volumes de données en raison de la vitesse d'échantillonnage nécessaire plus élevée. Toutefois, le bruit impulsif peut être observé plus clairement. Lorsqu'on procède à des mesures des Types B et C, il est toujours recommandé d'utiliser la largeur de bande plus étroite pour la mesure du bruit blanc gaussien et la largeur de bande plus grande pour la mesure du bruit impulsif uniquement.

9.4 Période de mesure

La période de mesure devrait être choisie en fonction du temps pendant lequel on peut s'attendre à d'importants changements du bruit mesuré. Par exemple, pour tenir compte des différences diurnes et nocturnes de la propagation des ondes décimétriques, et de l'utilisation temporaire d'un équipement, la période de mesure standard devrait être de 24 h. Pour tenir compte des variations saisonnières, les mesures en ondes décimétriques peuvent être répétées un certain nombre de fois chaque année. Pour les fréquences supérieures à 30 MHz, une période d'étude de 10 h au minimum pendant les jours ouvrables est recommandée.

9.5 Séparation du bruit artificiel du bruit atmosphérique (mesure de Type C seulement)

Aux fréquences inférieures à 30 MHz, des parties importantes de la composante bruit impulsif peuvent avoir pour origine le bruit atmosphérique telle la foudre. Lorsque les mesures sont uniquement destinées à déterminer le bruit artificiel, il faudra soustraire le bruit atmosphérique du résultat des mesures. Cela n'est toutefois possible que pour le bruit impulsif. Pour identifier l'origine du bruit impulsif, il est nécessaire d'effectuer simultanément des mesures en deux emplacements différents à savoir:

- l'emplacement de mesure, et
- l'emplacement de référence.

La distance entre ces deux emplacements devrait être supérieure à la portée des émissions de bruit artificiel type mais suffisamment petite pour supposer que les conditions de propagation ionosphérique sont les mêmes (distances recommandées: 500 m à 10 km).

Les équipements de mesure sur les deux emplacements doivent être exactement synchronisés dans le temps (décalage maximal: 100 ms). On peut obtenir une synchronisation exacte dans le temps par exemple:

- en basculant périodiquement le récepteur de mesure sur un signal étalon de temps (par exemple: DCF77);
- en utilisant un signal horaire délivré par un récepteur GPS associé.

Le temps transmis peut être utilisé pour régler l'horloge interne du processeur ou bien un décalage entre l'horloge du processeur et le temps réel transmis peut être calculé et utilisé pour corriger l'horodatage qui doit être mémorisé à chaque exploration de mesure.

Grâce à ces horodates chaque exploration peut ensuite être comparée avec l'exploration correspondante effectuée à l'autre emplacement. Lorsqu'un signal apparaît sur les deux emplacements de mesure, on suppose qu'il s'agit de bruit atmosphérique ou d'une émission utile reçue par l'onde ionosphérique et qui est éliminé des résultats avant traitement ultérieur. Les signaux qui sont seulement reçus à l'emplacement de mesure sont supposés être du bruit artificiel émanant de sources proches.

9.6 Collecte des données et post-traitement

9.6.1 Mesure du bruit blanc gaussien avec détecteur de valeur quadratique moyenne (mesure de Type A)

Un analyseur de spectre explore une bande de fréquences en un certain nombre de pas («casiers» de fréquences). Un nombre normal de casiers avec les analyseurs de spectre modernes est de 500-10 000. Si le temps d'exploration est de 10 s par exemple, les résultats des mesures est une base de données (matrice) de $500 \times 8\,600$ à $10\,000 \times 8\,600$ échantillons de mesure par jour. Pour avoir la possibilité d'exclure certaines parties de mesure et appliquer différentes méthodes statistiques, cette base de données devrait être ensuite traitée ultérieurement avec un logiciel spécialisé.

9.6.2 Mesure du bruit blanc gaussien + bruit impulsif avec échantillonnage de données brutes (Types de mesure A, B et C)

Pour permettre une évaluation complète des impulsions, il serait nécessaire de procéder à un échantillonnage si rapide de manière à ce que chaque impulsion unique soit captée au moins une fois. Toutefois, cette façon de procéder se traduirait par un très grand volume de données à stocker. Pour une évaluation statistique, une observation continue de la plage de fréquences n'est pas nécessaire. Au lieu de cela, l'étude peut être divisée en explorations individuelles (d'une fréquence ou d'une bande de fréquences). Une exploration devrait au moins durer 0,5 s au cours de laquelle le niveau momentané du signal est collecté aussi rapidement que possible ($T_s \leq 1/\text{RBW}$). Ensuite, une pause de quelques secondes peut être introduite pendant laquelle il n'y a pas de mesure, jusqu'au démarrage de l'exploration suivante. Cette méthode produit encore de nombreux millions d'échantillons par étude, échantillons qui doivent être évalués statistiquement par un logiciel spécialisé.

10 Traitement des données

10.1 Vue générale

Le Tableau 9 présente les différentes étapes du traitement pour les différents principes de mesure.

TABLEAU 9
Étapes de traitement

Étape de traitement	Mesure de la valeur quadratique moyenne du bruit blanc gaussien	Echantillonnage des données brutes
Correction pour le bruit de l'équipement	x	x
Détermination du bruit blanc gaussien au moyen de la «méthode des 20%»	x	
Validation de la valeur couperet à 20%	x	
Tracé de la distribution de probabilité d'amplitude des échantillons bruts		x
Calcul de F_a	x	x
Séparation des échantillons de bruit impulsif du bruit blanc gaussien		Facultatif
Regroupement des impulsions en salves		Facultatif
Séparation des impulsions dues au bruit artificiel du bruit atmosphérique		Facultatif
Calcul de la distribution des paramètres des impulsions		Facultatif

10.2 Correction pour le bruit de l'équipement

Les signaux que l'on mesure sont en réalité superposés au bruit de l'équipement. Pour déterminer la différence entre le bruit externe et le bruit de l'équipement, on peut réaliser une mesure manuelle afin de déterminer la correction à appliquer comme suit:

- mesurer le niveau du bruit blanc gaussien en utilisant un détecteur de valeur quadratique moyenne sur une fréquence actuellement libre;
- remplacer l'antenne par une charge de 50Ω et mesurer la somme du bruit du système et du bruit thermique de la charge, en utilisant les mêmes réglages que précédemment.

Si la différence des résultats des mesures selon a) et b) est de K dB ou plus, aucune correction supplémentaire pour le bruit de l'équipement n'est nécessaire. Si elle est inférieure, le bruit de l'équipement mesuré selon b) doit être soustrait linéairement de toutes les valeurs de bruit externe:

$$P_{WGN} = p_a - \frac{f-1}{f} p_b \quad (2)$$

où:

- p_a : niveau de bruit mesuré selon a) en unités linéaires
 p_b : niveau de bruit mesuré selon b) en unités linéaires

f : facteur de bruit de l'équipement.

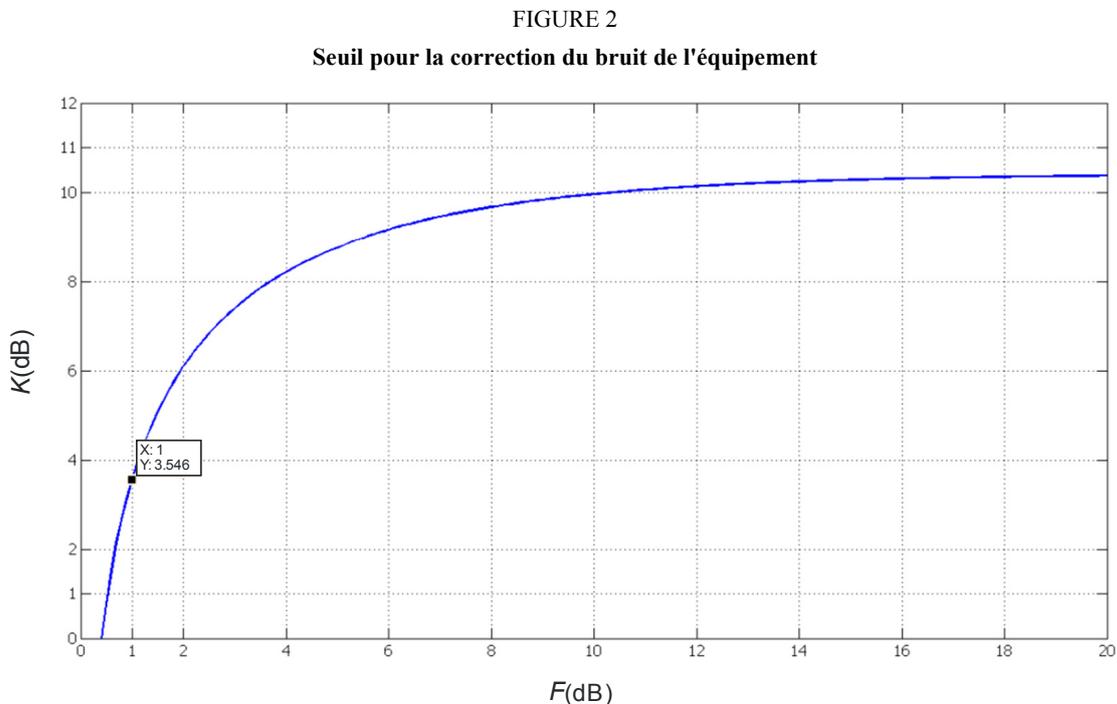
Le coefficient K peut être calculé comme suit:

$$K(\text{dB}) = 10 \log \frac{11(f-1)}{f} \quad (3)$$

Dans les spécifications des équipements le facteur de bruit F est en général indiqué. Etant donné que ce facteur de bruit est exprimé en décibels, le facteur de bruit f peut être calculé comme suit:

$$f = 10^{\left(\frac{F}{10}\right)} \quad (4)$$

La courbe calculée dans la Fig. 2 donne la valeur de K en fonction du facteur de bruit.



SM.1753-02

10.3 Détermination du niveau du bruit blanc gaussien au moyen de la «méthode des 20%» (valeur quadratique moyenne – mesure du bruit blanc gaussien uniquement)

En particulier, en dessous de 30 MHz on ne peut pas supposer que la fréquence (ou plage de fréquences) de mesure est libre pendant toute la période de mesure. Il est donc recommandé d'effectuer une exploration sur une petite plage de fréquences au lieu d'effectuer les mesures sur une seule fréquence. Les occupations non désirées peuvent être éliminées du résultat en utilisant uniquement les 20% échantillons présentant les niveaux les plus faibles et éliminer les autres 80%. Toutefois, cette façon de procéder toutefois élimine aussi un certain bruit contenant des échantillons et donnerait de faibles niveaux de bruit sauf si une correction était appliquée. La correction nécessaire est déterminée en connectant une source de bruit blanc au récepteur, en prenant certains échantillons de mesure et en déterminent le niveau efficace moyen à partir de tous les échantillons (100%). Puis, les 80% supérieurs sont supprimés et le niveau efficace moyen est déterminé à partir

des 20% échantillons les plus faibles. La correction à appliquer est la différence entre les deux niveaux quadratiques moyens moyennés (100% et 20%).

10.4 Validation de la valeur couperet à 20% (mesure uniquement du bruit blanc gaussien en valeur quadratique moyenne)

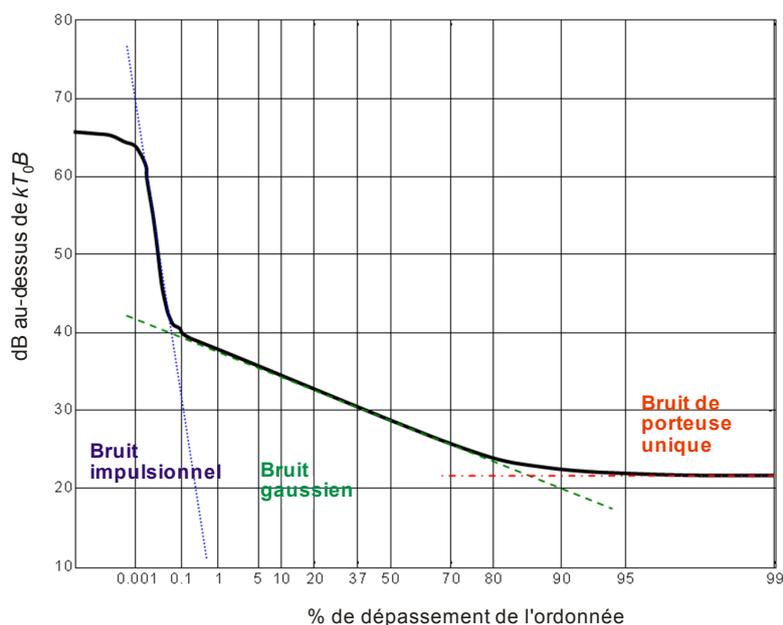
Pour les ondes décimétriques, 20% des valeurs les plus faibles constituent une valeur commode permettant de déterminer le niveau du bruit. Pour les autres plages de fréquences, on peut vérifier que cette valeur à 20% est correcte ou devrait être remplacée par une autre valeur. Certaines méthodes de validation de la valeur couperet sont décrites dans l'Appendice 2.

10.5 Tracé de la courbe de distribution de probabilité d'amplitude (échantillonnage de données brutes uniquement)

Si l'on utilise l'échantillonnage de données brutes pour déterminer le bruit blanc gaussien, le niveau quadratique moyen peut théoriquement être déterminé par moyennage linéaire des niveaux de puissance de tous les échantillons mesurés pendant un certain temps (intégration). Toutefois, cette façon de procéder n'est correcte que si rien d'autre que du bruit blanc gaussien n'est présent pendant la mesure. En particulier en ondes décimétriques, cette condition peut souvent ne pas être supposée satisfaite. En pareils cas, le niveau quadratique moyen du bruit blanc gaussien peut être déterminé en insérant les données brutes dans une courbe appelée graphe de «distribution probabilité d'amplitude» (APD: Amplitude Probability Distribution). Cette courbe indique la proportion en pourcentage des échantillons de mesure qui dépassent une certaine amplitude (voir la Fig. 3).

FIGURE 3

Distribution type de probabilité d'amplitude



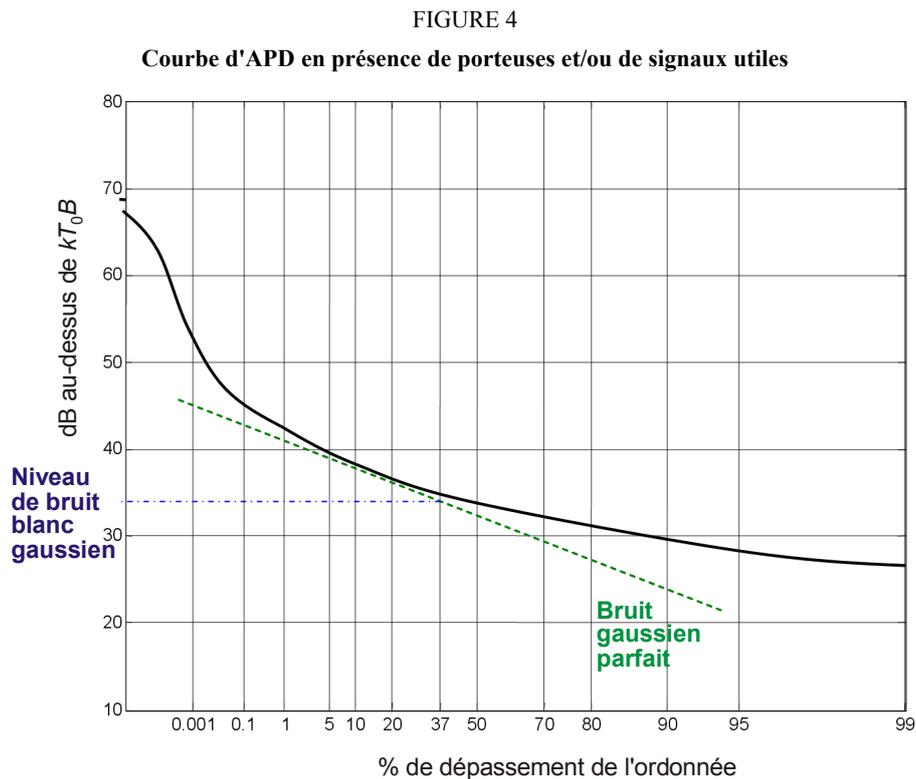
SM.1753-03

L'échelle de l'axe des x de la courbe de PDA est de type Rayleigh. Avec cette échelle, on peut facilement séparer différents types de bruit. Le bruit blanc se présente sous forme d'une droite inclinée (au milieu de la courbe). On peut démontrer mathématiquement que le gradient de cette droite est de -10 lorsque les deux échelles sont converties en échelles linéaires. Cela signifie que cette droite baisse de 10 dB entre 0,1%; 37%; 90% et 99%.

Le bord ascendant à gauche indique un bruit impulsif, le nivelage vers le côté droit est dû aux porteuses uniques émanant de sources voisines et la limite d'indication de niveau inférieur du récepteur de mesure.

En l'absence de porteuses uniques ou d'émissions utiles à bande étroite, le niveau quadratique moyen total est la valeur au point où la courbe franchit 37% sur les abscisses.

Toutefois, la présence de porteuses et d'émissions utiles non seulement produit une augmentation à l'extrémité droite de la DPA, mais déplace la courbe vers le haut y compris la valeur à 37% et produit une courbe concave et non pas une droite dans la partie centrale de la courbe comme le montre la Fig. 4.



SM.1753-04

Dans ce cas, le niveau du bruit blanc gaussien est déterminé en ajustant une droite avec la pente d'un bruit blanc gaussien parfait à la courbe. La valeur du niveau efficace du bruit blanc gaussien est le point où la tangente franchit la valeur de 37% sur l'abscisse.

Pour améliorer la précision, les valeurs mesurées relevées dans le temps peuvent être transposées dans le domaine fréquences en appliquant une transformée de Fourier. Un deuxième graphe d'APD est élaboré à partir des valeurs résultantes dans le domaine fréquences et de nouveau, une tangente est ajustée à la partie centrale du graphe. Le niveau quadratique moyen du bruit blanc gaussien est également la valeur à 37% de l'ADP dans le domaine fréquences. En présence de signaux utiles ou de porteuses uniques lors des mesures, seul un des deux graphes d'APD est relevé en fonction de la nature des signaux. Le bruit blanc gaussien global exact est alors la plus petite des deux valeurs à 37%. Cette méthode d'évaluation est particulièrement nécessaire lorsque les mesures de bruit sont effectuées dans des bandes occupées par des signaux utiles. Lorsque des fréquences sont choisies de manière telle qu'il n'y ait pas de porteuses dominantes ou d'émissions utiles, le recours à une transformée de Fourier rapide n'est pas nécessaire.

10.6 Calcul de F_a

Conformément à la Recommandation UIT-R P.372, le niveau de bruit est exprimé sous la forme d'un facteur de bruit d'une antenne sans perte dû au bruit externe F_a exprimé en dB au-dessus du bruit thermique.

Le bruit thermique peut être calculé comme suit:

$$P_0 = 10 \log(K * t * b) \quad (5)$$

où:

K : constante de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$ (J/K))

t : température ambiante (K)

b : largeur de bande équivalente du bruit du filtre de mesure (Hz)

A la température de référence t_0 de 290 K (17°C), P_0 devient égal à -174 dBm dans une largeur de bande de 1 Hz.

Le niveau de bruit mesuré est la somme du bruit externe et du bruit provenant du système de mesure, composé principalement du bruit du récepteur et le bruit émanant du LNA au cas où un LNA serait utilisé. Le facteur de bruit externe f_a peut être calculé au moyen des équations de la Recommandation UIT-R P.372. Dans des environnements de mesure réels, il est tout à fait réaliste de supposer que la température de toutes les parties du système de mesure sont égales. De plus, on peut fixer la température de référence t_0 à 17°C sans introduire une très grande erreur sauf pour les cas spéciaux avec des températures extrêmes. Sous ces hypothèses, l'équation clé qui peut être utilisée pour le calcul de f_a est la suivante:

$$f_a = f - f_c f_i f_r + 1 \quad (6)$$

où:

f : facteur de bruit total mesuré exprimé en unités linéaires (p_{meas}/p_0)

f_c : facteur de bruit associé à l'antenne (puissance à la sortie de l'antenne/puissance d'entrée disponible)

f_i : facteur de bruit associé à la ligne de transmission (puissance à l'entrée du câble/puissance à la sortie du câble)

f_r : facteur de bruit du système de réception (récepteur et le cas échéant LNA).

Tous les paramètres en minuscule sont donnés en unités linéaires et non en dB. Pour parvenir aux unités logarithmiques plus communément utilisées, il convient de noter que tous les paramètres sont des niveaux de puissance, ainsi la règle de conversion suivante s'applique:

$$F_a \text{ (dB)} = 10 \log(f_a) \quad (7)$$

Dans certaines situations de mesure réelles on peut faire les hypothèses suivantes:

- l'antenne peut être considérée étant sans perte ($f_c = 1$), en particulier lorsqu'on utilise des antennes adaptées (par exemple, des doublets accordés pour les fréquences supérieures à 30 MHz).
- La perte sur la ligne de transmission peut être négligée ($f_i = 1$), en particulier pour les fréquences inférieures à 30 MHz.

- Le bruit du récepteur peut être négligé ($f_r = 1$) lorsque la puissance de bruit mesurée est supérieure d'au moins 10 dB au bruit du récepteur (voir le § 10.2).

Dans ces cas la puissance de bruit mesurée est pratiquement égale à la puissance de bruit radioélectrique externe.

Lorsqu'il est mesuré en dBm, le facteur de bruit F_a en dB peut être calculé comme suit:

$$F_a = P_n - P_0 \quad (8)$$

où:

P_0 : puissance de bruit thermique (dBm)

P_n : puissance de bruit externe (dBm).

Pour les fréquences supérieures à 60 MHz, lorsqu'on utilise un doublet vertical accordé, F_a peut être calculé comme indiqué plus haut. Pour les fréquences inférieures cependant, il est en général pas possible d'utiliser une antenne sans perte.

Dans ce cas, le facteur de bruit externe peut, lorsqu'on applique le facteur d'antenne moyen (voir le § 7.2) comme suit:

$$E = U + AF \quad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \quad (9)$$

où:

E : champ en dB($\mu\text{V/m}$)

U : Tension aux bornes de l'antenne en dB(μV)

AF : facteur d'antenne en (dB)².

Lorsque AF est connu, F_a peut être calculé à partir du niveau de bruit mesuré comme suit:

$$F_a = P + AF - 20 \log(f) - 10 \log(b) + 202,5 \quad \text{dB} \quad (10)$$

où:

F_a : facteur de bruit de l'antenne dû au bruit externe (dB)

P : niveau efficace du bruit blanc gaussien (dBm)

AF : facteur d'antenne (dB)

f : fréquence de mesure (MHz)

b : largeur de bande de mesure (Hz).

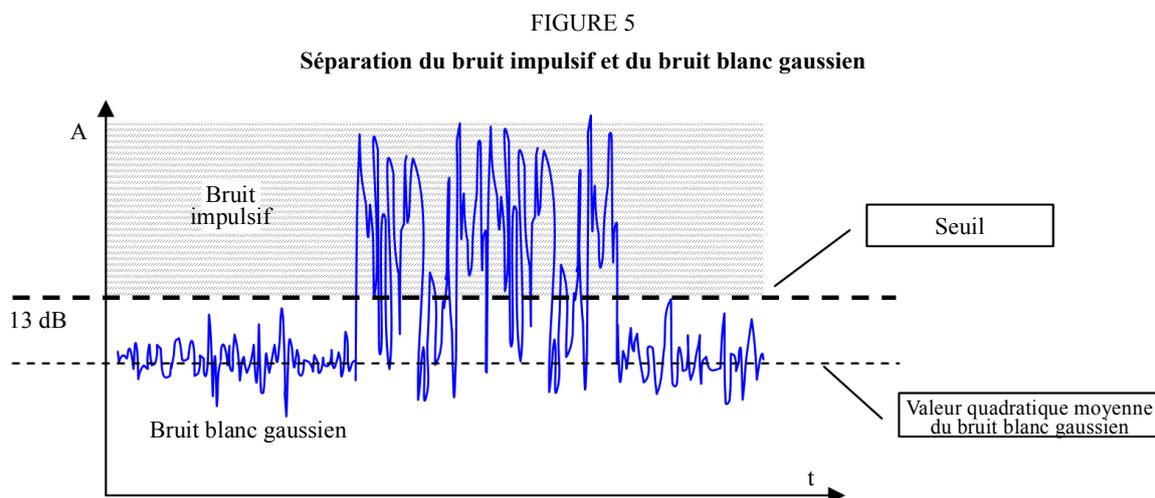
La formule ci-dessus a été élaborée en utilisant la formule (7) de la Recommandation UIT-R P.372 pour un antenne unipolaire verticale courte, la formule (9) ci-dessus et en supposant un système de mesure ayant une impédance d'entrée de 50 Ω avec P (dBm) = U (dB(μV)) - 107 dB.

10.7 Séparation des échantillons de bruit impulsif du bruit blanc gaussien (mesure des Types B et C uniquement)

L'expérience montre que le bruit impulsif dû au bruit artificiel ne correspond pas tout à fait à l'un des modèles mathématiquement décrits. Lorsqu'il est échantillonné à une fréquence suffisamment

² Le facteur d'antenne est en général simplement donné et exprimé en dB. On admet que cela est dimensionnellement incorrect, mais reflète la pratique technique habituelle.

rapide, le bruit blanc gaussien peut présenter des crêtes dont le niveau est bien supérieur au niveau moyen. Pour extraire uniquement les échantillons liés au bruit impulsif, il faut appliquer un seuil qui est bien au-dessus des crêtes de bruit blanc gaussien. Ce seuil est fixé à 13 dB au-dessus du niveau quadratique moyen du bruit blanc. Le niveau du bruit blanc gaussien déterminé ainsi est l'habituel facteur CREST (différence entre les valeurs quadratiques moyennes et les valeurs crête) pour le bruit blanc gaussien. Tous les échantillons de mesure au-dessus de ce seuil sont traités comme du bruit impulsif.



SM.1753-05

10.8 Combinaison des trains d'impulsion en vue de former des salves (mesures des Types B et C uniquement)

Lorsqu'on étudie l'amplitude d'impulsions réelles en fonction du temps, on peut constater que la plupart des impulsions sont en réalité des séries de crêtes ou «trains d'impulsions». Etant donné que la mesure des niveaux des impulsions pour le bruit artificiel est axé sur le potentiel de perturbation des impulsions, il est nécessaire d'intégrer les crêtes d'un train d'impulsions en un événement appelé «salve». Cette intégration est effectuée aussi longtemps que 50% des échantillons de mesure sont supérieurs au seuil.

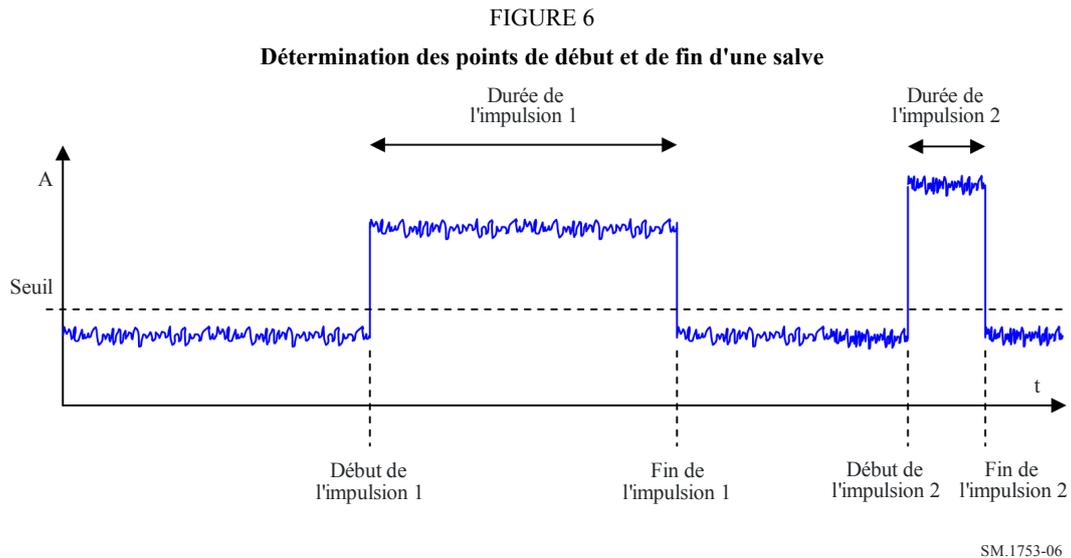
La durée de chaque salve dans un relevé est calculée de manière telle que les conditions suivantes sont satisfaites pour toutes les impulsions du relevé complet:

- 1 l'échantillon qui suit immédiatement un début de salve est toujours supérieur au seuil, l'échantillon qui suit la fin d'une salve est toujours inférieur au seuil;
- 2 50% au minimum des échantillons entre le début et de fin d'une salve sont supérieurs au seuil.

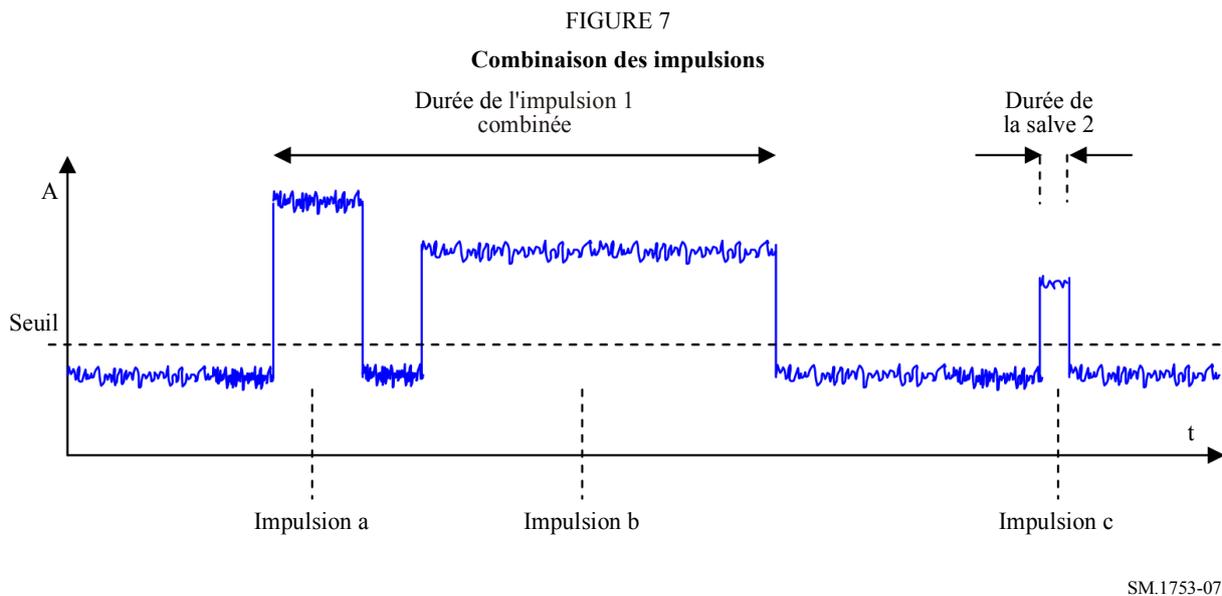
Pendant un temps correspondant à 25% de la durée d'une salve, tous les échantillons avant le début d'une salve et après la fin de cette salve sont inférieurs au seuil.

La conséquence de ces conditions est que certaines crêtes dans des trains d'impulsions atypiques sont combinés en une seule et longue salve.

Les Figures ci-après illustrent certains exemples.



Compté depuis le centre de l'impulsion 1 dans la Fig. 6, l'intervalle entre la fin de l'impulsion 1 et le début de l'impulsion 2 est supérieur à 25% de la longueur de l'impulsion 1, de sorte que la seconde crête est interprétée comme une impulsion distincte.



Dans la Fig. 7, les trois conditions définies ci-dessus sont toutes satisfaites pour l'impulsion *a* pour la qualifier de salve complète. Toutefois, pour l'impulsion *b* la condition selon laquelle au moins 25% des échantillons de mesure avant le début de la sous-salve doivent être inférieurs au seuil, n'est pas satisfaite à moins que l'impulsion *a* ne soit incluse et une impulsion combinée (salve) ne soit formée. L'intervalle de temps entre la fin de cette salve 1 et le début de l'impulsion 3 est supérieur à 25% de la durée de la salve 1. L'impulsion *c* n'est donc pas incluse mais considérée comme une impulsion distincte.

10.9 Séparation des impulsions dues au bruit artificiel du bruit atmosphérique (mesure de Type C uniquement)

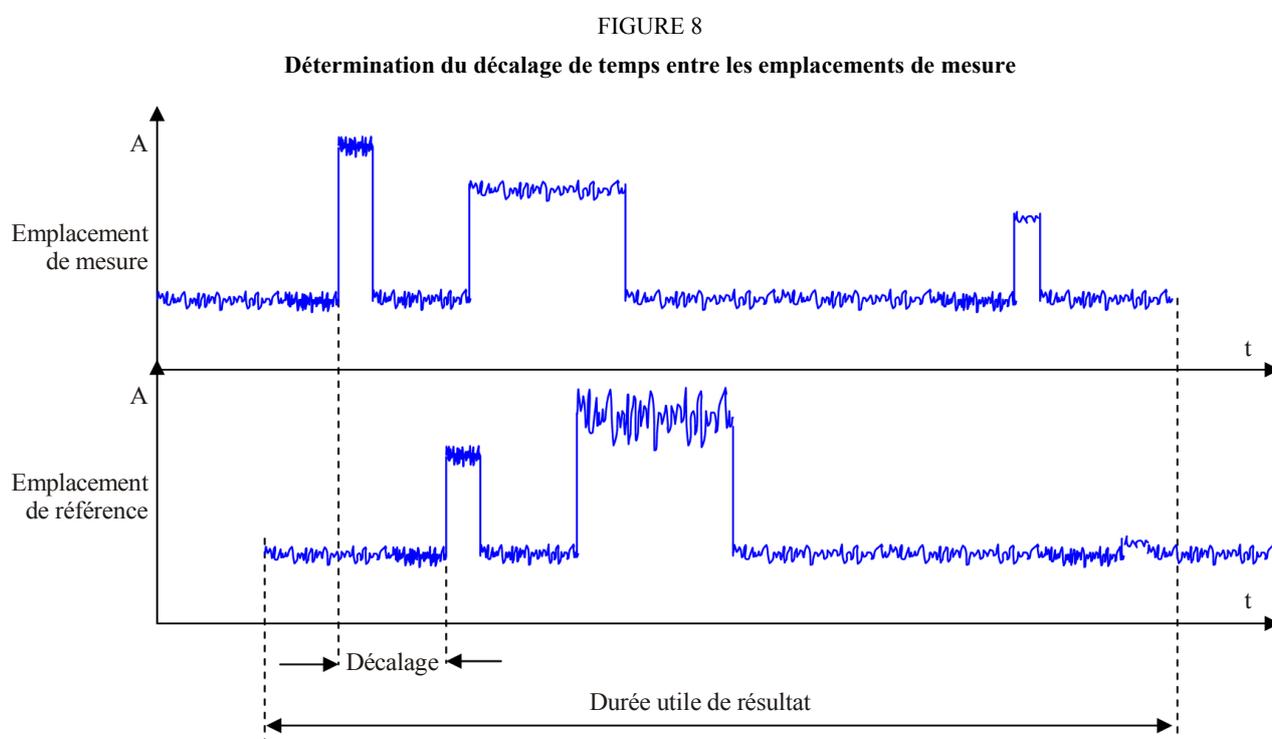
Comme indiqué précédemment, cette séparation n'est possible que si la méthode 3 avec mesures synchronisées dans le temps en deux emplacements est appliquée. Le bruit impulsif émanant du

bruit atmosphérique (orages principalement) seront reçues à la fois à l'emplacement de mesure et à l'emplacement de référence, ainsi l'objectif est de repérer ce type de signaux dans les résultats des mesures.

Comme la synchronisation dans le temps des équipements de mesure ne sera jamais aussi précise qu'un échantillon, le décalage temporel exact entre les deux emplacements doit être déterminé en premier. Cette détermination sera effectuée en comparant mutuellement les instants de début et de fin de tous les échantillons d'impulsions/salves sur l'emplacement de mesure et l'emplacement de référence et en calculant une valeur de corrélation. Ensuite, tous les échantillons de mesure prélevés sur l'emplacement de mesure seront décalés dans le temps d'un échantillon et la valeur de corrélation sera de nouveau calculée et ainsi de suite. La position présentant la corrélation la plus grande définit le décalage temporel exact entre les deux mesures. Les étapes d'évaluation suivantes sont uniquement appliquées aux échantillons qui ont fait l'objet de mesures aux deux emplacements (durée utile du résultat).

Exemple: La corrélation maximale est obtenue pour un décalage de +100 ms appliqué à l'emplacement de référence. Le temps de mesure (d'exploration) était de 1 s. La durée utile du résultat varie alors de 0,1 à 1,0 s pour l'emplacement de référence et de 0 à 0,9 s pour l'emplacement de mesure (voir la Fig. 8).

A l'intérieur de la durée utile du résultat, on étudie les échantillons de début et de fin d'impulsion/de salve. Si, pour chaque impulsion/salve, ils se produisent avec une tolérance de 50% de la durée d'impulsion/de salve aux deux emplacements de mesure et de référence, l'impulsion/la salve est effacée des résultats étant donné qu'elle est supposée être reçue par l'onde ionosphérique et par conséquent être probablement de nature atmosphérique. Lorsqu'un point de début d'impulsion/de salve apparaît uniquement à l'emplacement de mesure, il est conservé pour le traitement du bruit impulsif.



10.10 Calcul de la distribution des paramètres d'impulsion (mesures des Types B et C uniquement)

Comme indiqué précédemment, pour caractériser entièrement le bruit impulsif, il faut connaître les paramètres suivants:

- niveau des impulsions/salves
- durée des impulsions/salves
- fréquence ou période de récurrence des impulsions/salves
- durée totale des impulsions/salves.

Etant donné que les trois premiers paramètres évoluent aléatoirement, leurs valeurs doivent être présentées sous la forme d'une courbe de distribution.

10.10.1 Niveau des impulsions/salves

Le niveau total des impulsions/salves (niveau du bruit impulsif) ne peut être correctement mesuré que pour des durées d'impulsion/de salve égales à $1/\text{RBW}$ au minimum. Etant donné qu'une impulsion/salve ne peut perturber un système de communication numérique moderne que si sa durée est au moins égale à la durée d'un symbole, le choix d'une largeur de bande du filtre de mesure (RBW) conformément au Tableau 8 se traduit déjà par des valeurs mesurées qui représentent le potentiel de perturbation vrai. Le niveau du bruit impulsif, cependant, dépend encore de la RBW. Par conséquent, la RBW utilisée doit être indiquée lorsque les niveaux de bruit impulsif sont présents. Pour ne pas dépendre de la largeur de bande de mesure, il est recommandé de normaliser les résultats de mesures sur la largeur RBW utilisée et donner le niveau du bruit impulsif sous la forme d'une densité de niveau. L'axe y de la distribution de probabilité d'amplitude est exprimé en $\text{dB}(\mu\text{V}/\text{MHz})$. Pour convertir la valeur mesurée du bruit impulsif en densité de niveau du bruit impulsif, on applique la formule suivante:

$$Wg = U + 20 \log(1/b) \quad \text{dB}(\mu\text{V}/\text{MHz}) \quad (11)$$

dans laquelle:

- Wg : densité spectrale $\text{dB}(\mu\text{V}/\text{MHz})$
- U : tension de bruit provenant d'une antenne sans perte $\text{dB}(\mu\text{V})$
- b : largeur de bande du bruit (MHz).

Dans le cas où l'antenne ne peut pas être considérée comme sans perte, il faut appliquer la correction adéquate à la tension mesurée conformément au § 10.6.

On tracera une courbe de distribution du bruit impulsif par fréquence et par classe d'emplacement conformément aux Tableaux 5 et 6.

10.10.2 Durée et période des impulsions/salves

Une fois les échantillons de début et de fin des impulsions/salves identifiés, la durée de chaque impulsion/salve est calculée comme suit:

$$N_1/f_s \quad (12)$$

où:

- N_1 : nombre d'échantillons entre le début et la fin d'une impulsion/salve
- f_s : fréquence d'échantillonnage.

La période d'impulsion/salve est calculée comme suit:

$$N_2/f_s \quad (13)$$

où:

N_2 : nombre d'échantillons entre points de début d'une impulsion/salve consécutive
 f_s : fréquence d'échantillonnage.

10.10.3 Durée totale des impulsions/salves

La durée totale des impulsions/salves est donnée sous la forme d'un pourcentage de la durée totale de l'étude, à savoir:

$$i = (N_i / N) * 100 \quad (14)$$

où:

N_i : nombre d'échantillons au-dessus du seuil de bruit impulsif
 N : nombre total d'échantillons de mesure.

11 Présentation des résultats

11.1 Mesures du bruit blanc gaussien

Parallèlement à la présentation en termes de F_a , il est également courant de donner le niveau de bruit en termes de champ, en particulier en-dessous de 30 MHz. Pour ce type de présentation, il est nécessaire de convertir la puissance de bruit mesurée au moyen de l'équation suivante extraite de la Recommandation UIT-R P.372:

$$E_n = F_a + 20 \log(f / \text{MHz}) + B + 95,5 \quad (15)$$

dans laquelle:

F_a : facteur de bruit dû au bruit externe ($F_a = 10 \log(f_a)$)

f : fréquence de mesure (MHz)

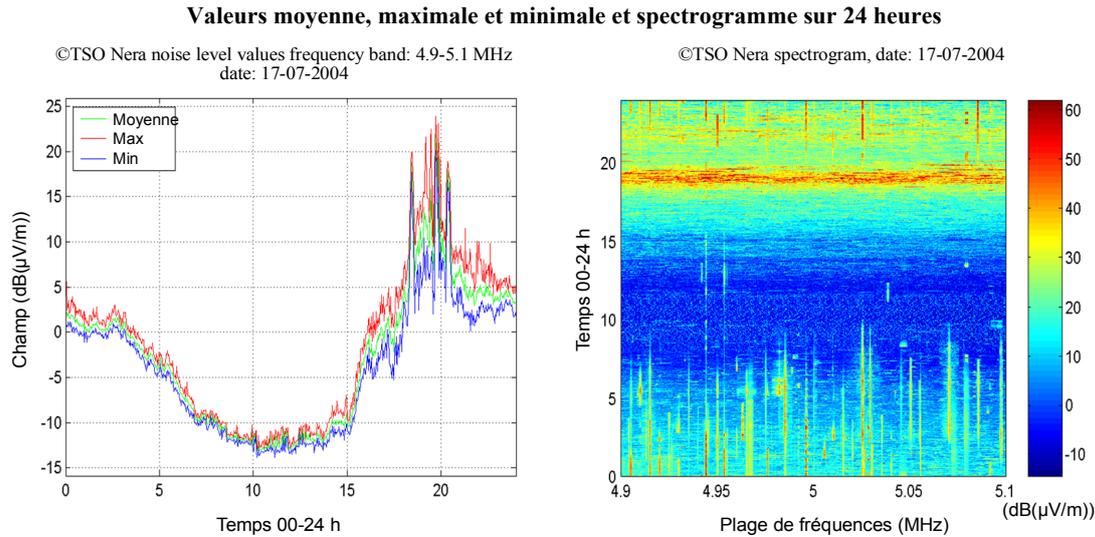
B : largeur de bande logarithmique de mesure du bruit équivalent ($B = 10 \log(b)$).

L'équation (15) est valable pour les antennes unipolaires courtes. Pour les doublets accordés, la valeur de 95,5 doit être remplacée par 99,0.

Pour les plages de fréquences inférieures à 30 MHz, le bruit radioélectrique varie fortement dans le temps pendant la journée. Par conséquent, les résultats calculés doivent être présentés sur 24 h.

La Fig. 9 illustre un exemple de résultats de mesures à 5 MHz (4,9-5,1 MHz). On peut voir les valeurs maximales, moyennes et minimales sur 24 h sur la courbe de gauche et le spectrogramme, contenant toutes les explorations sur 24 h sur la droite.

FIGURE 9



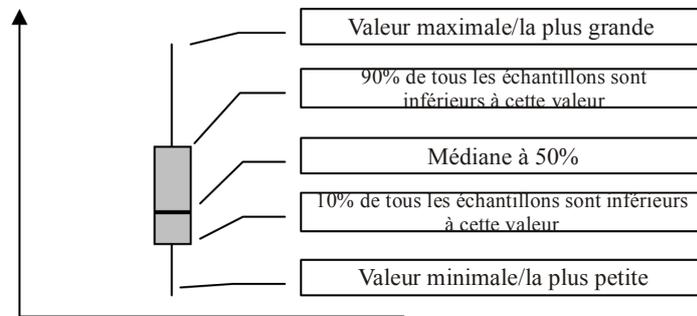
SM.1753-09

Les résultats peuvent être intégrés sur des périodes de 1 h et présentés sous forme de tableau (une valeur pour chaque heure).

Une autre façon de présenter les résultats concernant le bruit blanc gaussien est appelée diagramme en pavés (boxplot en anglais). Pour chaque heure, les valeurs maximales, les 90% inférieures, médianes, 10% inférieures et minimales sont calculées et représentées dans un pavé.

FIGURE 10

Principe du diagramme en pavés



SM.1753-10

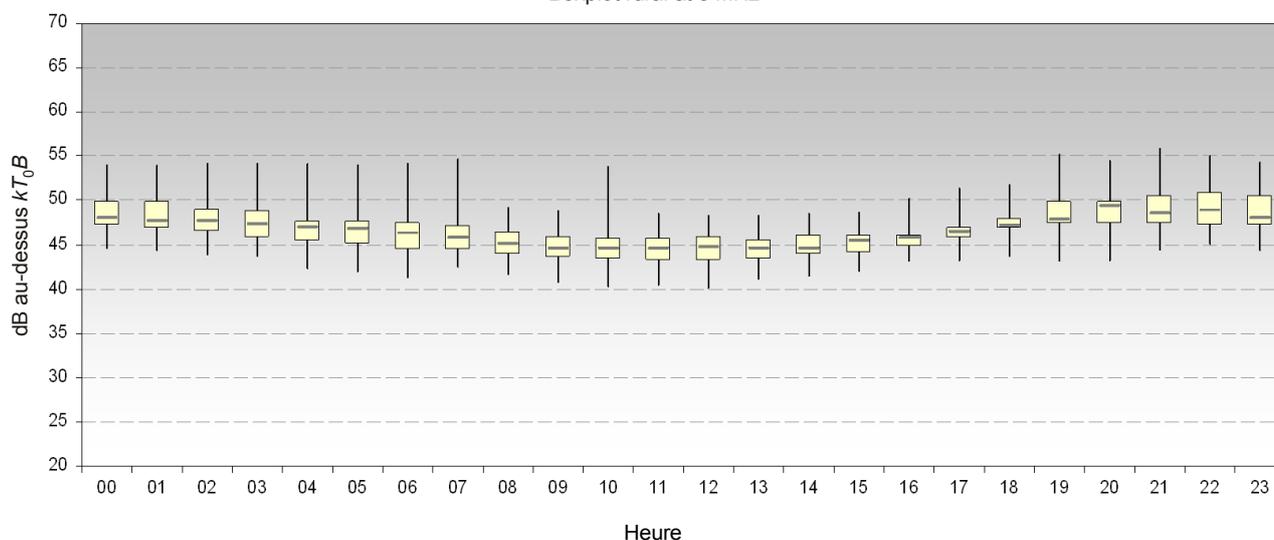
Le diagramme en pavés est particulièrement utile pour présenter les résultats de plusieurs mesures en un seul diagramme.

La Fig. 11 montre un diagramme en pavés résumant 23 mesures effectuées en zone rurale.

FIGURE 11

Résultats concernant le bruit blanc gaussien présentés sous la forme d'un diagramme en pavés

Boxplot rural at 5 MHz



SM.1753-11

11.2 Mesure du bruit impulsif

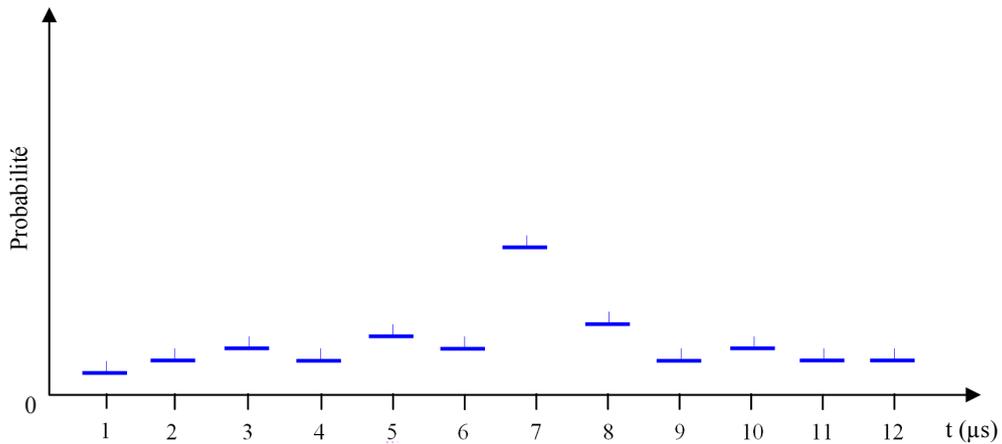
Les statistiques de niveau d'impulsion/de salve sont présentées de façon optimale sous forme d'un graphique de distribution de probabilité d'amplitude comme dans la Fig. 3. Lorsque tous les échantillons de mesure sont inclus dans la distribution de probabilité d'amplitude (échantillons de bruit impulsif et de bruit blanc gaussien), le nombre relatif d'impulsions peut être directement déduit du graphique par lecture de la valeur où le graphique quitte la ligne droite vers la gauche. Dans l'exemple de la Fig. 3 cette valeur est de 0,1%.

Toutefois, des informations plus détaillées concernant la distribution en amplitude des impulsions peuvent être obtenues à partir d'une distribution produite à partir des échantillons de bruit impulsif seulement et convertie en densités de niveau (voir le § 10.10.1).

La distribution des durées d'impulsion/salve peut être présentée de façon optimale sous forme d'un graphique indiquant la probabilité relative en fonction de la longueur ou de la période elle-même, comme montré à la Fig. 12.

FIGURE 12

Exemple de distribution de la durée d'impulsion/de salve



SM.1753-12

Cet exemple montre que la plupart des impulsions ont une durée de 7 μs .

La résolution temporelle de ce graphique est égale à la vitesse d'échantillonnage.

12 Limitations

L'approche décrite visant à séparer le bruit impulsif du bruit blanc gaussien et à calculer ses valeurs clé se traduit aboutit aux limites suivantes concernant les paramètres du bruit impulsif.

TABLEAU 10

Limitations concernant le bruit impulsif mesurable

Paramètres	Valeur
Niveau de bruit impulsif minimal	13 dB au-dessus du niveau du bruit blanc gaussien
Durée minimale d'impulsion	1/fréquence d'échantillonnage
Durée maximale d'impulsion	Pour les mesures avec des analyseurs à balayage: durée du balayage Pour les mesures continues: durée des mesures
Fréquence minimale de récurrence des impulsions	Pour les mesures avec des analyseurs à balayage: 1/durée de balayage Pour les mesures continues (exemple FFT): 1/temps d'acquisition
Fréquence maximale de récurrence des impulsions	Fréquence d'échantillonnage/2

Appendice 1

Vérification du choix de la fréquence du bruit blanc gaussien au moyen de la méthode de décomposition en valeurs singulières (SVD)

Le décomposition en valeurs singulières (SVD) est une méthode analytique permettant de déterminer si le bruit mesuré est non gaussien. En général, la SVD est une technique d'approximation matricielle qui filtre en les éliminant les valeurs nulles et fonctionne avec les valeurs singulières de la matrice. Les matrices sont reliées aux signaux et la SVD sépare efficacement le bruit des données des signaux.

L'application de la SVD en vue de déterminer le bruit gaussien est une procédure en trois étapes:

Etape 1: Utilisant les valeurs I et Q des signaux mesurées pour former une valeur complexe $x(n)$ de longueur N , on construit avec les valeurs des signaux mesurées une estimée de la séquence d'autocorrélation (ACS: Autocorrelation Sequence) avec la longueur de M et une autocorrélation avec cette séquence comme suit:

On détermine d'abord l'ordre p de la taille de la matrice d'autocorrélation R_x . Cette taille dépend des échantillons de données disponibles. Si une séquence d'autocorrélation ACS de longueur M a été calculée avec N échantillons mesurés lors d'une exploration, la taille de la matrice d'autocorrélation est $(p+1)*(p+1)$ où $M=p+1$. On peut utiliser un nombre aussi petit que $p=19$, mais en principe, une valeur plus élevée se traduit par un meilleur classement.

On construit ensuite une estimée \hat{R}_k de la matrice d'autocorrélation (généralement complexe):

$$\hat{R}_x = \begin{bmatrix} \hat{r}_x(0) & \hat{r}_x^*(1) & \hat{r}_x^*(2) & \cdots & \hat{r}_x^*(p) \\ \hat{r}_x(1) & \hat{r}_x^*(0) & \hat{r}_x^*(1) & \cdots & \hat{r}_x^*(p-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{r}_x(p) & \hat{r}_x(p-1) & \hat{r}_x(p-2) & \cdots & \hat{r}_x(0) \end{bmatrix} \in \mathbf{C}^{(p+1) \times (p+1)} \quad (16)$$

dans laquelle:

$$\hat{r}_x(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x(n+m)x^*(n) \quad (17)$$

L'astérisque * désigne une valeur conjuguée. A noter que comme R_x est une matrice d'autocorrélation, $p+1$ valeurs uniques d'ACS sont utilisées pour remplir le matrice. Les valeurs uniques sont construites au moyen de l'équation (17). Chacune de ces valeurs utilise jusqu'à N mesures.

Etape 2: Dans cette étape, on évalue les valeurs singulières de la matrice de l'équation (16) par application de la méthode SVD. A partir de la SVD de \hat{R}_k , on calcule deux matrices unitaires auxiliaires U et V et une matrice diagonale Σ de la même taille:

$$\hat{R}_x = U\Sigma V^H \quad (18)$$

Il y a $p + 1$ valeurs singulières σ_k de la matrice Σ qui sont nulles ou positives. A noter que comme Σ est une matrice diagonale, les valeurs singulières sont tout simplement les valeurs diagonales.

Etape 3: Evaluation des quantités fondée sur les valeurs singulières comme métrique pour décider le bruit est gaussien. En particulier, une métrique $v(k)$ et son indice k sont calculés au moyen de l'équation (19)):

$$v(k) = \frac{\|\hat{R}_k^{(k)}\|_F}{\|\hat{R}_k\|_F} = \left[\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_k^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_{p+1}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

dans laquelle $\|\hat{R}_k\|_F$ est la norme de Frobenius d'une matrice \hat{R}_k .

A noter que la norme de Frobenius correspond à la norme d'un vecteur qui est obtenu en empilant les colonnes de la matrice sur les unes sur les autres.

L'étape finale vise à déterminer la valeur de l'indice de référence k qui satisfait la relation $v(k) = 0,95$. En fonction du niveau de confiance exigé, des valeurs autres que 0,95 peuvent être utilisées. Le niveau de confiance augmente lorsque la valeur devient proche de 1. Sur la base des expériences, il est recommandé d'utiliser la valeur de 0,95 comme valeur pratique.

Si $k > \frac{p+1}{2}$, les échantillons ne contiennent que du bruit gaussien, dans les autres cas, ils contiennent un ou plusieurs signaux plus du bruit.

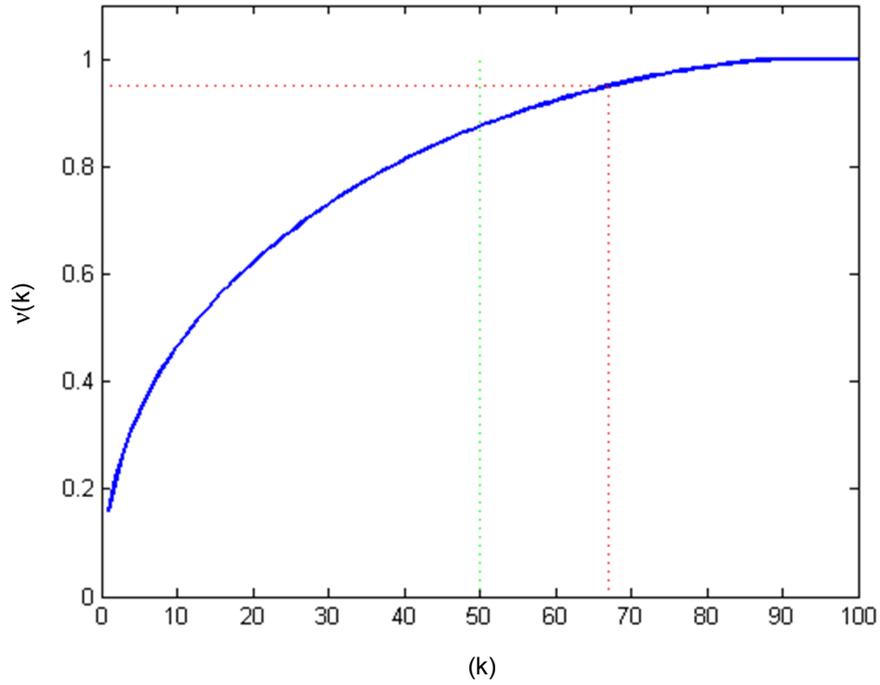
La valeur maximale possible de k est $p + 1$. A noter qu'à mesure que k croît dans l'équation (19) $v(k)$ converge vers 1. La Fig. 13 montre un exemple de graphique pour un signal qui contient des échantillons de bruit uniquement.

La Fig. 14 montre un exemple d'une exploration qui contient du bruit mélangé à quelques porteuses peu intenses.

FIGURE 13

Graphique donnant $v(k)$ dans le cas de bruit blanc gaussien

$(v(k)) p = 99, k(v_{0,95}) = 67$

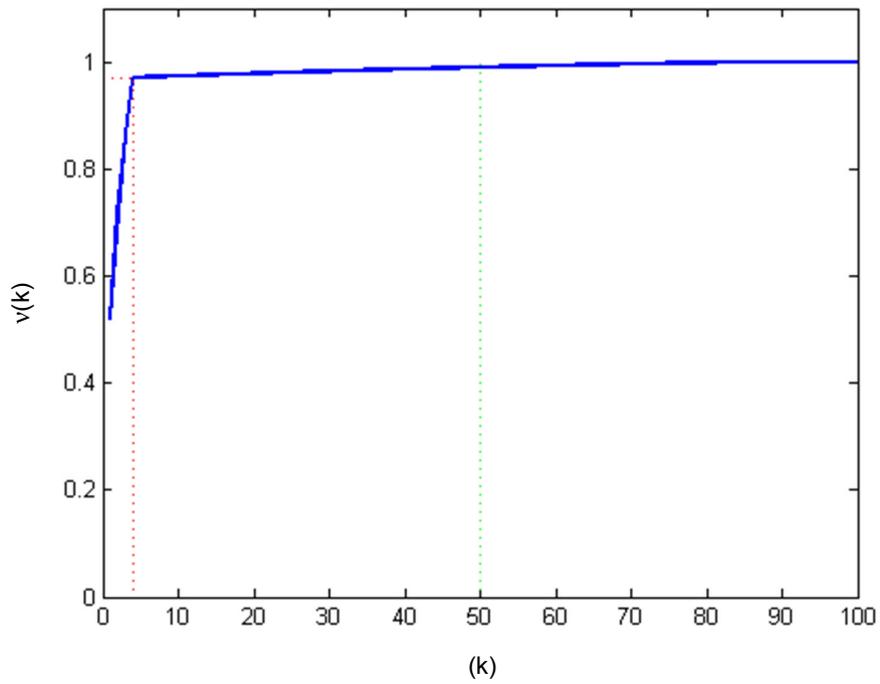


SM.1753-13

FIGURE 14

Graphique donnant $v(k)$ dans le cas de 4 multi-porteuses (la puissance de canal est de -97 dBm)

$(v(k)) p = 99, k(v_{0,95}) = 4$



SM.1753-14

On peut constater que bien que le rapport signal à bruit S/N des porteuses injectées soit très faible (la courbe d'APD est virtuellement une droite), la courbe $v(k)$ a un comportement totalement différent de celle où seul du bruit est présent. La méthode SVD est bien plus sensible que l'évaluation pure de l'APD.

La méthode est également applicable aux mesures de valeurs réelles.

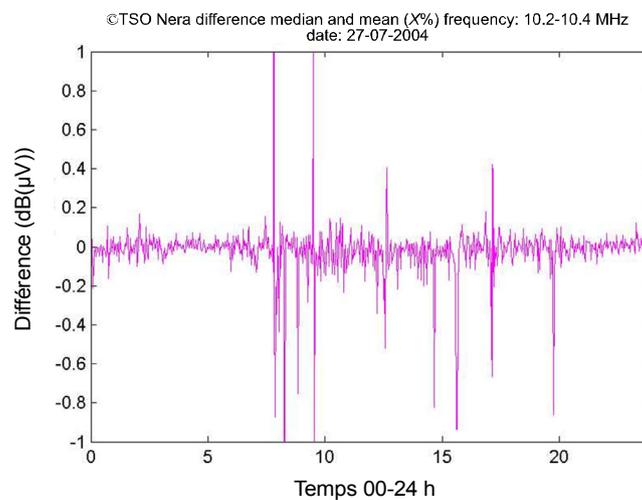
Appendice 2

Vérification de la valeur couperet au moyen des mesures directes des valeurs quadratiques moyennes

On suppose que $X\%$ des valeurs mesurées dans une exploration contiennent uniquement des échantillons de bruit. Si le pourcentage correct des valeurs est exclu du processus d'évaluation, les valeurs médiane et moyenne des échantillons de bruit restants devraient être les mêmes. Un test pratique consiste à tracer la courbe des différences entre les valeurs médiane et moyenne, qui est à l'évidence influencée par les signaux autres que du bruit.

FIGURE 15

Différence entre les valeurs moyenne et médiane (sélection à 20%)



SM.1753-15

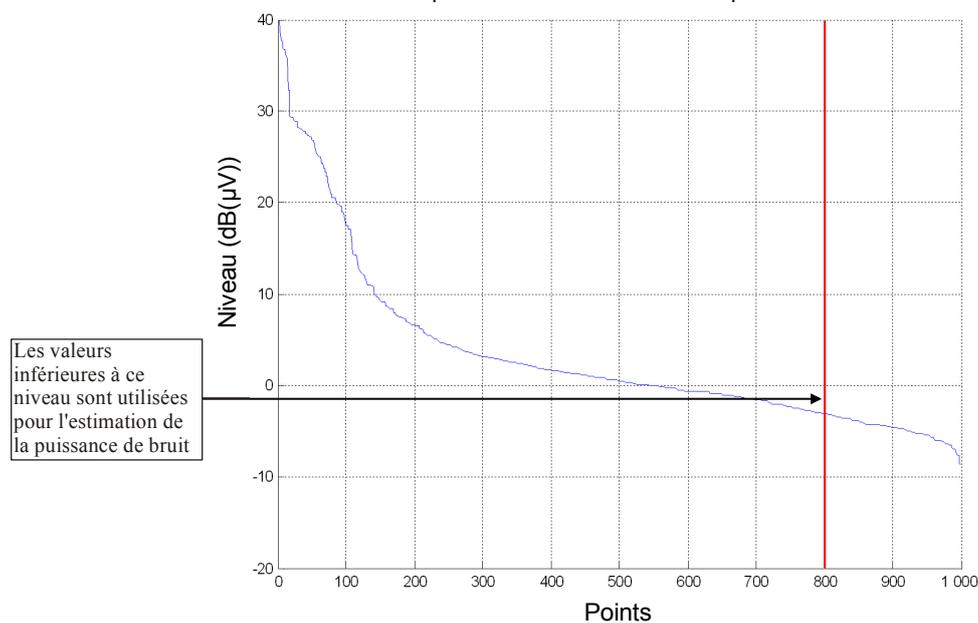
A titre d'exemple le graphique de la Fig. 15 montre la différence entre les valeurs moyenne et médiane avec un pourcentage constant de 20% de toutes les explorations. La période d'exploration est de 24 h (00:00 à 23:59). De 07:00 à 20:00 les orages sont à l'origine de fortes pentes que l'on constate dans la distribution de la sélection à 20% et aussi de grandes différences entre les valeurs médiane et moyenne de la puissance.

Un autre test consiste à tracer la courbe donnant le nombre d'échantillons de mesure d'un certain niveau en fonction de ce niveau et vérifier si la courbe du côté droit du point couperet « $X\%$ » est régulière et a une faible pente. Un exemple est donné à la Fig. 16.

FIGURE 16

Explorations choisies aléatoirement avec valeurs triées

Explorations sur une seule fréquence triées



SM.1753-16

La valeur couperet choisie (droite verticale) se trouve à 800 échantillons de mesure sur 1 000 ce qui correspond à 20%. On peut constater dans cet exemple que le choix de la valeur couperet n'est pas critique: toute valeur comprise entre 70 et 10% (300 et 900 échantillons) aurait pu être choisie étant donné que c'est l'intervalle où la courbe a une pente fixe.

Ces deux méthodes de test nécessitent *a priori* un étalonnage. Il faut également utiliser un nombre significatif d'échantillons dans les calculs; on ne peut, par exemple, utiliser un seul échantillon pour ce type de test.

Références

- Recommandation UIT-R P.372 – Bruit radioélectrique.
- Rapport UIT-R SM.2055 – Mesure du bruit radioélectrique (*Radio noise measurements*).
- Rapport UIT-R SM.2155 – Mesure du bruit artificiel dans la gamme des ondes décimétriques (*Man-made noise measurements in the HF range*).
- Rapport UIT-R SM.2157 – Méthodes de mesure pour les systèmes de télécommunication à haut débit de données par courants porteurs sur le réseau électrique (*Measurement methods for power line high data rate telecommunication systems*).